

CA1 EP 2092C02

Canada. AES.

CCD 92-02

REVIEW OF MODELS FOR CLIMATE CHANGE AND IMPACTS ON
HYDROLOGY, COASTAL CURRENTS AND FISHERIES IN B.C. 1992.

DIGEST

CA 1 EP 2092C02

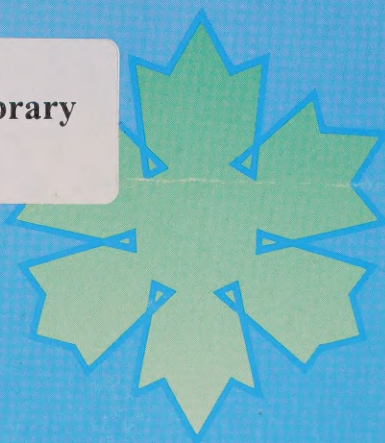
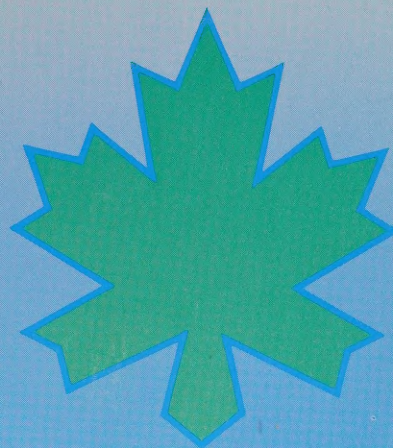
Review of Models for
Climate Change and
Impacts on Hydrology,
Coastal Currents and
Fisheries in B.C.

CCD 92-02



Earth Sciences Library

Canada



CLIMATE CHANGE DIGEST

- CCD 88-03 Implications of Climate Change for Downhill Skiing in Quebec
- CCD 88-04 Economic Perspectives on the Impact of Climate Variability and Change: A Summary Report
- CCD 88-05 Implications of Climatic Change for Tourism and Recreation in Ontario
- CCD 88-06 Estimating Effects of Climatic Change on Agriculture in Saskatchewan, Canada
- CCD 88-07 Socio-Economic Assessment of the Physical and Ecological Impacts of Climate Change on the Marine Environment of the Atlantic Region of Canada - Phase I
- CCD 88-08 The Implications of Climate Change for Natural Resources in Quebec
- CCD 88-09 CO2 Induced Climate Change in Ontario: Interdependencies and Resource Strategies
- CCD 89-01 Climate Warming and Canada's Comparative Position in Agriculture
- CCD 89-02 Exploring the Implications of Climatic Change for the Boreal Forest and Forestry Economics of Western Canada
- CCD 89-03 Implications of Climatic Change for Prince Albert National Park, Saskatchewan
- CCD 89-04 Implications of Climate Change on Municipal Water Use and the Golfing Industry in Quebec
- CCD 89-05 The Effects of Climate and Climate Change on the Economy of Alberta
- CCD 90-01 Implications of Climate Change for Small Coastal Communities in Atlantic Canada
- CCD 90-02 The Implications of Long-Term Climatic Changes on Transportation in Canada
- CCD 91-01 Climate Change and Canadian Impacts: The Scientific Perspective
- CCD 92-01 Global Warming: Implications for Canadian Policy
- CCD 92-02 Review of Models for Climate Change and Impacts on Hydrology, Coastal Currents and Fisheries in B.C.



Environment
Canada

Environnement
Canada

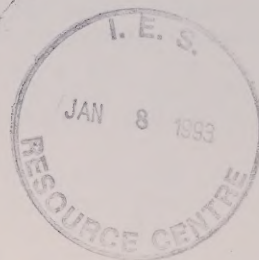
REVIEW OF MODELS FOR CLIMATE CHANGE AND
IMPACTS ON
HYDROLOGY, COASTAL CURRENTS AND FISHERIES IN B.C.

Prepared for
Climate Change Digest
Atmospheric Environment Service

by

G.A. McBean, O. Slaymaker, T. Northcote, P. LeBlond
and T.S. Parsons

University of British Columbia



This Report Contributes to State of Environment Reporting



This paper contains a minimum of 50% recycled fibres,
including 10% post-consumer fibres.

INTRODUCTION

The Canadian Climate Centre (CCC) has funded a number of studies to investigate the potential impacts of climate warming. The first issue of the Climate Change Digest identified the major socio-economic studies undertaken since 1984. A list of earlier titles in the series appears on the inside front cover.

DISCLAIMER

This publication contains the summary results of a study conducted by the University of British Columbia, under contract to the Canadian Climate Centre. The views and opinions expressed herein are those of the authors and do not necessarily state or reflect those of the Government of Canada or any agency thereof.

Single copies of this publication may be obtained, free of charge, by writing to the:

Climate Services Division
Canadian Climate Centre
4905 Dufferin Street
Downsview, Ontario
M3H 5T4

(416) 739-4331/4328

To purchase copies of the complete report, write to:

Dr. G.A. McBean
Department of Oceanography
University of British Columbia
Vancouver, B.C.
6270 University Blvd.
V6T 1Z4

Published by Authority of the
Minister of the Environment

© Minister of Supply and Services
Canada 1992

Catalogue No. En57-27/1992-02
ISBN 0-662-59209-3
ISSN 0835-3980

**REVIEW OF MODELS FOR CLIMATE CHANGE AND IMPACTS
ON HYDROLOGY, COASTAL CURRENTS AND FISHERIES
IN BRITISH COLUMBIA**

Prepared by

G. A. McBean, O. Slaymaker, T. Northcote , P. LeBlond
and T. S. Parsons
University of British Columbia

1. STUDY HIGHLIGHTS

- British Columbia is characterized by complex topography, large river systems and a climate greatly influenced by the ocean. Much of B.C.'s economic wealth stems from the interaction of its climate and natural resources.
- Global climate models indicate that there will be substantial climatic changes that will impact British Columbia. Due to relatively low spatial resolution of the models and the high topographic complexity of the province, these modelling results have to be carefully interpreted when applied to B.C.
- Equilibrium doubled CO₂ warming for B.C. is assessed to be 7°C in winter and 4°C in summer, both with an uncertainty of 3°C. Wintertime precipitation increases would be approximately 0.5 mm. per day; the changes would be smaller in summer and could be negative (decreased precipitation).
- To model the hydrological regime, it will be necessary to develop a hierarchy of models dealing with at least five distinct hydrologic regions whose mean annual water balances differ markedly.
- Many studies have shown that freshwater fisheries will be influenced by climate change. Now is the time to develop models so as to allow for fisheries management policies to become more opportunistic, adaptive and experimental.
- The coastal ocean responds to river discharge, local atmospheric forcing and interaction with the deep ocean. Each of these components must be fully integrated into models of the coastal ocean to investigate how it will adapt to and modify climate change.
- Projected climate changes may reduce salmon stocks by lowering coastal salinities and increasing temperatures. Since salmon is a very important commercial fisheries, reduction in salmon stocks would have a major economic impact. It is essential that research be undertaken to clarify these relationships.

- Common to all the areas of modelling reviewed is the conclusion that, although considerable advances have been made, much more research needs to be done. The research must include a balanced approach of observational, experimental and theoretical work. In view of the level of concern about climate warming, there is urgency that this work proceed with strong support and be started now; the time between the commencement of scientific work on problems of this magnitude and the presentation of finished results is measured in several years to decades, not months to years.

2. INTRODUCTION AND OBJECTIVES

Climate change caused by human activities has recently become a topic of major political and public interest. There is now a strong scientific consensus that the earth's climate will change more over the next 50-100 years than it has changed in the past 5,000 years. The impact of such climate change and the speed at which it will occur are expected to have world-wide implications.

Since much of B.C.'s economy is related to its natural environment, it is reasonable to expect that climate change will have a significant impact on the province's economy and lifestyle. B.C.'s fisheries, for example, span a variety of fresh and salt water environments which are potentially susceptible to climate change. However, B.C. has major topographic features, large rivers dissecting mountain ranges and a climate that is greatly influenced by the ocean. Since none of these features is well represented in current global climate models (GCMs), there is some concern as to the reliability of the models for B.C.

This report reviews the state of climate-change models with regard to their applicability to British Columbia and estimates the uncertainty in their climate-change scenarios. The linkages between the large-scale and regional-scale climatic changes are important issues that must be addressed. The report also reviews the availability of models for determining the effects of climate variability and change on river runoff, coastal ocean currents and fresh and salt water fisheries. In each case, the reliability of such models is assessed. Finally the report recommends approaches for further studies on the effects of climate change on water resources and fisheries in B.C.

3. CLIMATE MODELS AND THEIR APPLICATION TO BRITISH COLUMBIA

The climate of British Columbia is dominated by its topography. Global climate models (GCMs) typically have horizontal resolution of 4-5 degrees of latitude, 5-10 degrees of longitude and very smooth topography which does not resolve the finer-scale topographic features. Hence, it is necessary, when examining simulations of the present climate or scenarios of future climates, produced by GCMs, to develop methodologies to relate the large-scale climate to the detailed B.C. climate.

Five groups¹ have published results for simulations of the global climate under conditions of doubled atmospheric concentration of CO₂. These groups are the: Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL); Goddard Institute for Space Studies (GISS); Oregon State University (OSU); National Center for Atmospheric Research (NCAR); and the United Kingdom Meteorological Office (UKMO). The models vary in complexity and in ability to simulate the present climate of the earth. Four of the five models have effective horizontal resolution of about 4-5° latitude by 5-7° longitude, while the fifth is 8° by 10°. B.C. itself spans 11° latitude and about 11° longitude. None of the GCMs differentiate between the coastal mountains, interior plateau and Rocky Mountains; instead they have a smooth, relatively low mountain range. It must be recognized, however, that GCMs were developed to simulate the large-scale features of the climate. Scientific consensus is that it is not necessary to resolve the smaller-scale details in order to simulate accurately the large-scale climate.

Simulations of the present climate were examined to provide a measure of assurance of the ability of the GCMs to simulate future climate scenarios. Because of the interpretation procedure adopted (see below), zonal mean temperatures in the 50-60°N band were compared with observations. The results from the GFDL, GISS and OSU models were all within 2°C, both summer and winter. The NCAR model, however, has temperatures about 5°C too cold in the winter and 5°C too warm in the summer. The wintertime coldness of the NCAR model seems to be related to simulation too far south of sea ice in the Bering Sea. These results cast some doubt on the validity of NCAR simulations of doubled-CO₂ climate. Results for precipitation are more varied. The GFDL model, for example, simulates quite well the wintertime precipitation along the coast but not the summertime precipitation. Since much of the summertime precipitation is due to small-scale convective systems, this difference would be expected. Using the difference between precipitation and evaporation to model runoff, the GFDL model computes an annual mean runoff along the B.C. coast of less than 1 mm·d⁻¹; this compares with smoothed runoff values of 4 mm·d⁻¹ and values at specific locations of 9 mm·d⁻¹. Although river runoff is an important climatological variable, it is clear that the present GCMs cannot simulate it very well. The "bucket" hydrologies used in the models are inappropriate for the mountainous regions. However, it is expected that better estimates

¹ Since this report was prepared, three high resolution climate models have been used to simulate equilibrium doubled-CO₂ climates. For further information, the reader is referred to The Scientific Assessment of Climate Change, prepared by Working Group 1 of the Intergovernmental Panel on Climate Change. The main aspects are this report are not changed by the most recent results. The Canadian Climate Centre is one of the groups that has now completed a high-resolution simulation of equilibrium doubled-CO₂ climate. The CCC model has a number of improvements over other models, including higher resolution and improved parameterizations of clouds and sea ice, and its simulation of present climate is very good. For doubled CO₂, the CCC model predicts 3.5°C global warming and a 3.8% increase in precipitation, in general agreement with the results discussed in this report.

of runoff can be obtained by using the precipitation produced in climate models to drive hydrological models. Generally, the models simulate reasonably well the large-scale features of climate but do not simulate very well the topographically-induced climatic features of B.C.

An approach towards better simulation of the water cycle over British Columbia would be to use higher resolution models meshed within the larger-scale GCMs. The higher resolution models, with appropriate topography, would simulate the spatial variations in precipitation. Much more detailed models, with spatially varying soil and vegetation characteristics and a water flow grid to simulate river catchments, would be needed for the land surface and runoff components.

Particularly because of the importance of detailed topographic variations for B.C.'s climate, the usual approach of assessing the impacts of climate change by using the model's doubled- CO_2 scenario for model grid points in the specific region of interest is inappropriate for B.C. The approach adopted in this report is the following. First, the zonal mean changes for the latitude band $50\text{--}60^\circ\text{N}$ were reviewed. Stronger weighting was given to the models that best simulated present climate in that latitudinal band. Then, a qualitative adjustment was made for the oceanographic and topographic influences on the climate. Finally, the timing of the changes was deduced based on the ocean's delay of the full impact of a doubled- CO_2 climate.

Equilibrium doubled- CO_2 warming for the $50\text{--}60^\circ\text{N}$ latitude band was assessed to be 7°C for winter and 4°C for summer, both with an uncertainty of 3°C (Table 1). In winter, coastal areas would be warmed $1\text{--}2^\circ\text{C}$ less due to the oceanic influence. These figures pertain to monthly mean changes; it is possible that the variability of temperature could increase. However, it is more likely that the shape of the distribution of temperature values will remain similar to present. The probability of events with temperatures above any threshold will increase significantly with the shift to higher mean temperature. Winter-time precipitation increases would be approximately $0.5\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ with larger increases likely along the coast. The changes would be smaller in the summer and could be negative (decreased precipitation) in the interior. The uncertainty for the changes in precipitation is larger than that for temperature.

Table 1. Equilibrium doubled- CO_2 induced climate changes for B.C.

	Temperature	Precipitation
Winter	$+7^\circ\text{C}$ ($\pm 3^\circ\text{C}$)	$+0.5\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$
Summer	$+4^\circ\text{C}$ ($\pm 3^\circ\text{C}$)	small change

Most model simulations have been done by instantaneously increasing the CO_2 value to double the control value and running the model until an equilibrium is reached. Clearly, the real situation will be one of the CO_2 increasing slowly. While the adjustment or response time of the atmosphere is a month or less, the upper ocean

has an adjustment time of a few tens of years and the deep ocean an adjustment time of up to a thousand years. Because the ocean has longer adjustment times than the atmosphere, the actual warming of the coupled climate system will lag behind the equilibrium temperature corresponding to any value of a CO₂ increase. A very approximate scaling can be deduced assuming a mean adjustment time of 50 years. Warming by a given year can then be multiplied by a factor, which would be 0.6 for the warming in 2050, the year of assumed CO₂ doubling (Table 2). It should be noted that the reason why most climate models compute the equilibrium doubled-CO₂ climate, is that the computational requirements to compute the full ocean response are presently beyond most computer capability.

Table 2. Time-dependent scaling factors to account for ocean delay of warming.

Year	Scaling factor	Winter (°C)	Summer (°C)
2000	0.16	1.0	0.5
2025	0.37	2.5	1.5
2050	0.60	4.0	2.5

4. HYDROLOGICAL CHANGE IN BRITISH COLUMBIA

The primary input to hydrological models is precipitation, which is determined by regional climate. The local thermal climate determines whether the precipitation is rain or snow and the nature of snow and ice on the surface. Ground characteristics, such as infiltration capacity, soil moisture storage capacity, and thermal climate determine the runoff, storage and other parameters. In Canada's Cordilleran region, because of the effects of topography and the wide variety of surface materials, a full range of water pathway types and storage zones can be found.

In British Columbia, there are at least five distinct hydrologic regions whose mean annual water balances differ markedly (Table 3). The runoff-to-precipitation ratio (Q/P) varies from 0.33 to 0.90. The storage term (S) is important only for the Coast Mountain region. For time periods of less than a year, the storage term is more difficult to estimate. For many coastal rivers, the runoff regime parallels the precipitation, while in other regions, the snow storage effects are important. There is evidence that the precipitation in B.C. has undergone considerable variation over the past century.

To study the impacts of climate change on the hydrology of B.C., it will be necessary not only to split the area into five regions, but to consider the winter and summer seasons separately. A great variety of models is available for the creation of scenarios of hydrologic effects of climate change. In general, some variant of the Thornthwaite-Mather (1955) water balance method would seem essential down to the monthly time scale, in spite of, and in full recognition of, the difficulties associated with

evapotranspiration (ET) and groundwater recharge calculations. There is a strong revival of interest in water balance models partly because of their compatibility with the scale of output from GCMs but also, and more importantly, an increasing recognition that the unravelling of the water balance equation at several scales is the essential task of the hydrologic scientist.

Table 3 Mean annual water balance in B.C.

	P (mm)	=	Q (mm)	+	ET (mm)	-	S (mm)
Insular Mts.	4000	=	3500	+	500		
Coast Mts.	3500	=	3150	+	500	-	150
Interior Plat.	300	=	100	+	200		
Interior Mts.	1200	=	700	+	500		
Rocky Mts.	800	=	400	+	400		
REGIONAL	1350	=	1020	+	360	-	30

Gleick has discussed the rationale for the compatibility of GCMs and water balance modelling and their value in creating scenarios of hydrologic effects of climate change. The perceived advantages of water balance models over all other classes of models are identified as accuracy, flexibility and ease of use with respect to both hydrologic consequences of climate change and the ability to incorporate month-to-month and seasonal variations. In European drainage basins, runoff is very insensitive to climatic change by comparison with evapotranspiration but, in British Columbia, where the runoff term is so spatially variable, runoff is probably more sensitive than evaporation changes. So-called conceptual runoff models are also increasingly important. Transient effects, such as the magnitude, frequency and duration of extreme events and freshet flows are important.

Analysis of the distribution of runoff, evapotranspiration and precipitation data for given regions and their inherent variability is urgently needed. Many engineering designs depend on the concept of probable maximum precipitation and probable maximum flood. Because a temperature increase of 1°C increases the saturation vapour pressure over the sea by about 10%, total atmospheric moisture and total precipitation could increase and individual storm precipitation could be expected to increase with climate warming. The problem with this approach is the whole concept of a probable maximum flood.

We do not know what the impact of climatic change on British Columbia's hydrology will be. Given the wide range of potential impacts on fish, forestry, water supply and land use, it is urgent that focused research on B.C.'s water balance at regional scale be implemented.

5. EFFECTS OF CLIMATIC CHANGE AND VARIABILITY ON FRESHWATER FISHERIES IN B.C.

In regard to inland fresh-water fisheries, the major environmental factors that are directly affected by climate changes include stream discharge, water temperature, open water period and dissolved oxygen. Presently available models for global climate change seem too general and uncertain to be applied, in such a physiographically diverse region as British Columbia, to predict with much precision the probable effects on its freshwater-based fisheries. Generally, it is expected that coastal regions probably will be subject to smaller temperature increases in winter and interior regions to smaller rainfall increases or even decreases in summer.

Models presently exist to predict some effects of climate change (especially temperature increase) on a few key environmental factors controlling fish growth and predation in lakes (duration of ice-free season, summer surface and upper layer temperature, zooplankton biomass). For example, an increase in mean annual air temperature (as discussed above) could increase the number of ice-free days for lakes near Prince George from about 220 days to nearly 290 days. As higher temperatures should promote both increased primary production and nutrient remineralization, secondary production should also be highly temperature dependent. However, many complicating interactions in freshwater systems have precluded the possibility of general predictions. These models and our understanding need to be refined for better regional and local prediction and others developed to facilitate prediction of additional important parameters (e.g., stream discharge and temperature, lake flushing rate, oxygen conditions), bearing in mind that the changes can have both positive and negative effects on the fishes and their fisheries.

Rate of embryonic and larval development of fish are controlled by temperature, but many factors complicate the overall effects on fish populations. For example, earlier emergence may lead to increased growth but could result later in severe mortalities if the fish migrate earlier to other areas where conditions are not favourable. The net effects of increased upper layer warming and deeper layer oxygen depletion may be to reduce the volume of suitable summer habitat for many species of salmonids and could increase the frequency of "summer kill" events.

After maturity in the ocean, Pacific salmon and other fish presently migrate up river systems at temperatures close to a physiological optimum, so small increases could cause sub-optimal conditions and severe prespawning mortality. Changes in river discharge could also have effects on migratory fish. Higher temperatures could also cause a delay in spawning and affect prespawning mortality.

Climate change could also affect the fish distribution and community structure. The present distributions of fish have resulted, over a long period of time, of entries from other areas. For example, with climate warming there is potential for the successful migration of non-salmonoid warm-water species from southern portions of the Columbia River system. Although the

climate change discussed earlier is not expected to eliminate existing species in B.C., it is more likely that southern latitudinal margins of present species and their elevational limits will shift northward and upward.

Since the Pacific Cordilleran ecoclimatic region (the coastal region) will probably undergo less climatic change than other regions of the Province, fish closely linked to that region (such as coastal cutthroat trout, pink and chum salmon) will be less affected than fish that are broadly distributed throughout the province (such as rainbow trout, Dolly Varden char, chinook salmon, sockeye salmon and kokanee).

For some species, where topographic and access conditions permit, climate change may permit northward and elevational extensions in distribution; predictive models may help make general estimates for the extent of such changes but they will be conditioned largely by fish accessibility to the waters - unless humans take a direct role in spread by introduction or watershed modification.

Under major climate change and perhaps greater variability, management policies must become more opportunistic, adaptive and experimental if catastrophic mistakes are to be avoided in the continued consumptive use of the freshwater-derived commercial and recreational fisheries resources of British Columbia.

6. AVAILABILITY AND RELIABILITY OF MODELS FOR ASSESSING THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON CURRENTS OFF THE COAST OF B.C.

Three classes of forcing mechanisms are responsible for the properties and the circulation of the coastal ocean: 1) buoyancy-driven forcing through river discharge; 2) local atmospheric forcing through air-sea interaction processes; and 3) coastal impact of large-scale oceanic properties. The whole of the B.C. coast and indeed of the northeast Pacific may be thought of as an estuarine area: fresh water flux into the coastal area maintains a brackish surface layer which is everywhere an essential feature of the vertical density structure. Air-sea interaction processes act to re-enforce (in summer months) or to weaken (in winter) the basic haline stratification; tidal mixing erodes it and creates frontal transitions; advection affects the horizontal distribution of water properties. Summer warming and freshening of the surface layers contribute to the existence of a strong seasonal variation in stratification. The simplest climatic picture of water property distribution is thus one of a thin (5-50 m) layer of brackish water overlying saltier sea water. Vertical stratification is weakened by mixing in regions of strong tidal streams. Fronts separate well mixed and stratified regions. Variability in the properties of deeper waters (below 100 m) is related to wind-induced upwelling phenomena on continental shelf areas and to deep-water replacement processes in inner basins and inlets.

Wind-driven upwelling is associated with summer northwesterly winds which deflect surface waters offshore and bring cold, nutrient-rich deeper waters to the surface right along the shores of Vancouver Island and of the Queen Charlotte Islands. Upwelling

processes are also responsible for most of the variance in deeper (>100 m) water properties on the shelf and continental slope. Deep-water replacement occurs when denser water trickles over the sill into semi-enclosed coastal basins. Every so often, coinciding with the occurrence of a strong El Nino in equatorial regions, abnormally warm waters are found for a few months on the B.C. coast. Significant seasonal variability has been recognized near the coast and seasonal as well as interannual variability of the Alaskan Gyre has also been detected, with the intensity and location of the Gyre changing with time.

The estuarine circulation is a buoyancy-driven flow caused by the discharge of freshwater into the ocean, which takes freshwater seaward gradually mixing it with salt water from below. The estuarine drift of freshwater seaward is modulated by tidal mixing. There is thus some coupling between the effects of tidal currents, the winds and the estuarine flow. The most important oceanographic feature of the B.C. coast is the stratification set up by freshwater runoff. Direct atmospheric forcing is important in two ways: air-sea interaction processes combine with runoff to establish the vertical density structure; winds also cause currents. The modelling of two-dimensional estuarine circulation and of its dependence on meteorological, hydrological and tidal influences is now reaching a state where tides and deep water replacement may be explained. Reliable prediction is around the corner. Within a decade or so, it should be possible to provide a quantitative estimate of the impact of scenarios of climate change on tides and deep water replacement.

Tidal and river discharge fronts are regions of sharp transition in water properties that are frequently sharp but short lived. Equally important, if often less striking, are regional fronts, transitional zones between well stratified and vertically mixed waters. Much has been learned in recent years on fronts, their position and their influence on biological productivity. Numerical modelling is being pursued actively in a number of areas: methods of incorporating fronts in models of ocean dynamics are being developed; the interactions and generation of tidal mixing fronts with coastal currents is being modelled. Nevertheless, further work is required to resolve the balance of mixing and stratification processes responsible for the formation and evolution of fronts. On the B.C. coast, there is not at the present, beyond the confines of the Strait of Georgia, an adequate documentation of frontal positions and movement, and it is impossible to say how they would be modified by climate change.

Modelling of much diluted buoyancy-driven coastal currents has become increasingly popular in recent years and has focused on reproducing conditions observed along coastlines where there is considerable runoff. Detailed numerical modelling will be necessary to obtain results pertinent to a specific region. Observations are required to support and verify the results of the models. Another area of modelling is of tides in silled fjords towards understanding the phenomena responsible for deep-water replacement in coastal basins. Additional applications and verification remain necessary to achieve a level of confidence sufficient to predict the impact of small changes in runoff, atmospheric and oceanic phenomena associated with global warming.

The currents and the water properties on the B.C. coast reflect to a large extent the response of the ocean to local meteorological conditions. If the latter were to change, how would coastal oceanographic conditions be affected? It is through its upper surface that the ocean exchanges mass, momentum and energy with the atmosphere, and air-sea interaction has long been a strong focus of oceanographic research. At this time, it appears that one-dimensional upper-layer models are capable of explaining the thermal history of the upper ocean in regions where horizontal advection of heat from outside the area of interest does not contribute significantly to the heat budget (and freshwater discharge is not important). Further refinements must be brought to such models in regions where haline effects are important, specifying sources of freshwater as well as of heat. Prediction remains problematical and would depend as strongly on the quality of the data base continuously assimilated into the models as on the details of the models themselves (as in weather forecasting).

Given the strong horizontal inhomogeneity encountered in water properties and currents on the B.C. coast, one would expect a one-dimensional model to fail in many areas where advection is important. Modification of such models for freshwater input and application piece-wise to various areas of the B.C. coastal waters is suggested. Mainly because of the importance of horizontal heat and fresh water advection, there is no guarantee that these models would successfully explain the vertical structure of temperature and salinity and the position of frontal regions and, in particular, their interannual variability. Furthermore, the influence of fresh water runoff is so important in determining the vertical water structure on the B.C. coast that models attempting to predict the latter will have to combine both "thermocline" and buoyancy-driven flow models, while taking into account other effects, such as tidal mixing. There is thus a need for work in two directions. First, to document more precisely the position of transition zones in coastal waters and to relate them to atmospheric and discharge conditions. Second, to couple the modelling of estuarine and thermal buoyancy sources in describing the evolution of the upper layer. There is also a necessity to incorporate the wind-driven dynamical effects.

Upwelling is a common event in the summer on the B.C. coast; favourable regions are clearly revealed by satellite thermal imagery. Upwelling is perhaps the most striking, but it is certainly not the only response of coastal waters to atmospheric forcing. Much of the flow variability along the B.C. coast may be attributed to wind forcing, either locally or through the propagation of continental shelf waves created by wind action further south.

The physics of the three-dimensional response of the ocean to meteorological forcing has become much clearer in recent years and coarser features seem to be reproducible with some confidence provided adequate resolution of the bathymetry and of the forcing fields is available. Smaller scale features, such as fronts, continue to be difficult to model correctly because of the greater complexity of their physics and the higher demand on spatial resolution.

The mechanisms responsible for interannual variability of the deep-ocean circulation are under exploration. Models are being developed and tested, but they have not reached a stage where one might put much confidence in their results. El Nino modelling is also progressing vigorously, although no one knows how that phenomenon will be affected, if at all, in its intensity or frequency by global warming.

Changes in sea level observed at any one shore point are of course relative to the local land mass. Thus, local sea level variations may be due as much to changes in the level of the land as in that of the sea. The level of the sea may change because it contains more (glaciers melting) or warmer (thermal expansion) water, because of changes in ocean currents or in the response of the sea surface to the wind; the land may rise or fall following adjustment to glacial loading or as a consequence of large-scale tectonic forces.

The interpretation of oceanic time series relevant to the detection of long-term sea level trends continues to be a matter of active debate. Progress is being made in identifying the various causes of possible sea level change and perhaps in a decade, when the smoke clears up and the significance of the trends as well as their interpretation becomes firmer, it will be possible to model what is to be expected in the future.

7. THE AVAILABILITY OF MODELS FOR DETERMINING THE EFFECTS OF CLIMATE CHANGE AND VARIABILITY ON SALT WATER FISHERIES

In considering the influence of climate change on saltwater fisheries, it is apparent that not all fisheries will be affected in the same way. Some fish migrate large distances while others are sedentary. Some species spend most of their life in relatively deep waters where surface influences are much less apparent. While some fisheries are essentially resident to the Northeast Pacific, others migrate there only under certain conditions. Susceptibility of fish species to climate change not only varies with species but also to different stages of the life cycle within a species. The interactions of B.C. fisheries with changes in local climate are in Table 4.

Models to predict the quantity of fish have generally been of two types. The first determines total allowable catch and is usually based on short time series of relevant data. Climatic effects are usually not an important part of these models. The second type make use of longer time series to determine sustainable yield of any particular fishery. Some of these models include environmental factors that will change with changing climate.

Fisheries models using environmental factors can be grouped into three broad categories. First are statistical models relating stock abundance to one or two physical parameters. Single parameter models are probably unreliable but may be useful for short periods and as indicators of some transient ecological relationship. Small scale interannual differences in temperature and salinity which have proven useful indicators in the past, may be totally changed

Table 4 Interaction of B.C. Fisheries with Changes in Local Climate

Fishery	Life history events affected by climate			
	Spawning Life	Early Sea Life	Adult	Migration
Salmon (all species)	L	L	L	L
Herring	L	L	M	M
Halibut Cod, Sole, Rockfish etc.	M	M	S	S
Tuna	S	S	S	L
Mackerel	S	S	S	L
Pilchards	S	S	S	L
Anchovy	M	S	S	L
Crabs	L	L	S	S
Shrimps	L	L	S	S
Prawns	L	L	S	S
Oysters	L	L	S	S
Clams	L	L	S	S

L - large or most affected
M - moderately affected
S - small or least affected

by much larger long-term changes in these parameters. Multi-parameter models may be more reliable. Increased knowledge of physiological adaptations to environmental change and new mathematical techniques may increase the value of these models.

A second group are models relating the migration of adult fish stocks to some environmental factor or to a derived index of the physical environment. These models are particularly important in predicting catchability of different stocks as well as their relative availability to Canadian and other fishermen. Single or multiple parameter environmental models for adult fish migration are probably more reliable than the statistical models of stock abundance which depend on the young stages of fish.

Trophodynamic models aimed at understanding abundance of plankton (possibly including relationships with fish) are the third group. These models are most closely related to climatic forcing functions but are least closely related to fish stock. These models have been useful in other areas and have now been used for North American west coast environments. They may eventually prove useful in assessing impacts of climate change.

While interannual variability may be modelled using existing data sets, longer term changes (including El Nino-Southern Oscillation events) will require much more data collected over time in order to diagnose the frequency of such events.

If it is assumed that the warming due to greenhouse gases is about 5°C with an increase in precipitation, then most fisheries models would show some change in output. However, the predicted direction of that change assumes that the scale of environmental events is no greater than the interannual variability observed in the past. Since this is probably not true, it leads to considerable uncertainty in the prediction and emphasizes the need for better models.

Based largely on statistical models, the projected climate change would tend to reduce the salmon stocks by lowering coastal salinities and by increasing temperatures. Migration patterns of returning adults would also be affected. If these forecasts for the marine stages of fish are coupled with the scenario of decreased autumn river flow (due to decreased summertime precipitation over the interior of B.C.), then the combined effect of climate change on salmon stocks is a decrease. In compensation to this, warmer waters should increase stocks of species migrating from the south (e.g., tuna, mackerel and squid). A warming trend might increase the abundance of anchovy but decrease abundance of herring. Colonies of marine birds may decline in the southern part of the province but more exotic marine life such as species of birds and turtles from southerly latitudes may become more frequent visitors to our coast. These changes, however, may be modified by changes in the physical environment of the coastal waters, which also have a high degree of uncertainty.

It should be emphasized that it is important to introduce new management techniques to accommodate climate change before conflict breaks out between resource competitors and management over dwindling stocks of traditional fisheries and enhanced stocks of other fish.

There is now a strong scientific basis for believing that the climate of the globe and of B.C. in particular will change very significantly over the next 50 to 100 years. The details of this change are uncertain and the impacts of the change are probably more uncertain. However, we have some basic tools in our understanding of the physical and biological factors controlling the climate, hydrology, coastal oceanography and fisheries of B.C. For some of these factors we have models that can be used for understanding and possibly decision making. For other factors, the

models are either too rudimentary to be useful or nonexistent. The purpose of this report has been to identify and assess the state of our modelling capability and to set the direction for scientific and policy research to improve upon the situation.

8. RESEARCH RECOMMENDATIONS

It is clear from the above that there will need to be considerable improvements in GCMs (including their spatial resolution) before a more definitive statement can be made on regional climate change in B.C. In the interim, research activities should be carried out to improve the knowledge of the present climate of B.C. It is important to know the distribution of precipitation and the factors controlling it within the present climate. Then, it should be possible to link the changes in these factors in GCM simulations with doubled CO_2 , to deduce a modified precipitation regime. This physical-statistical approach should be combined with the development of regional models that can be embedded in GCMs to provide the regional-scale information and its relationship with topography. In support of the overall development of GCMs and regional models should be the development of models for evaporation, soil moisture and runoff that are applicable to the soils, vegetation and terrain of B.C.

Understanding of the impact of climate change on B.C.'s hydrology will depend on the development of modelling systems that can deal with the type of input obtainable from GCMs and which are adaptable to the complex topographic situation in the Province. A hierarchy of models will be needed to address different scales and problems. To develop and validate such models, a substantial increase in our information base on the present relationships between climate, river runoff, soil hydrology and other facets is needed. Bridging the gaps in understanding of the impacts of climate change on freshwater fisheries requires a concentrated examination of present linkages.

The modelling status of the coastal oceanic phenomena is related to the degree of understanding of the physics, and in particular to the relation between the phenomenon and its forcing parameters. In some simple cases, such as that of upper-layer thermal modelling, both theory and applications are solidly founded; in others, such as that of deep water replacement, enough recent progress has been made that one can envisage modelling of the impact of climate change with some confidence. In many other cases (frontal dynamics, cross-shelf exchange, sea-level variations) there is either a lack of observational background or of theoretical understanding which prevents the formulation of reliable models. From a general point of view, it appears that at least a decade of observations, theoretical development and model testing will be necessary before anything but broad speculations may be expressed about the impact of a possible global climate change on oceanographic conditions on the coast of British Columbia.

The modelling of climate/fisheries interaction should proceed from known probable relationships toward the construction of multispecies ecosystem models. Input to such models (the forcing functions) should include all the various aspects of climate change (e.g. temperature, river runoff etc.) and the output should be in terms of fish production of the various economic species. In order to construct such models, interaction will be required between scientists of many disciplines including physical oceanographers, planktologists, physiologists and fisheries managers. The models should be used initially to create scenarios of possible effects. Validation may eventually be possible from hindcasting and forecasting variations in fish populations. An alternative (or parallel) recommended approach is to develop sophisticated physical models of the ocean environment and use these to generate variables which can be statistically related to fisheries data. Such models would not produce the depth of understanding of the ecosystem models recommended above, but they may be easier to develop and apply with regard to certain key questions on fish abundance or migration. These models would be analogous to using numerical weather prediction to plan agricultural activities.

SOMMAIRE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

- SCC 88-03 Les répercussions d'un changement climatique sur l'industrie du ski alpin au Québec
- SCC 88-04 Les perspectives économiques liées aux répercussions de la variabilité et du changement climatiques : rapport sommaire
- SCC 88-05 Les répercussions du changement climatique sur le tourisme et les loisirs en Ontario
- SCC 88-06 L'évaluation des effets du changement climatique sur l'a...
- SCC 88-07 L'é... quences physiques et... le milieu marin... phase I
- SCC 88-08 Les... matique sur les ress...
- SCC 88-09 Le... CO₂ en Ontario : inte... re de ressources
- SCC 89-01 Le... tion relative du Cana...
- SCC 89-02 L'ex... nt climatique sur la f... re de l'ouest du Cana...
- SCC 89-03 Les... que sur le parc nati... wan
- SCC 89-04 Les... matique sur les beso... r l'industrie du golf
- SCC 89-05 Les... climatique sur l'éco...
- SCC 90-01 Les réperc... t sur les petites localités cotières de la région de l'Atlantique, au Canada
- SCC 90-02 Les répercussions du changement climatique à long terme sur le transport au Canada
- SCC 91-01 Le changement climatique et ses répercussions sur le Canada : le point de vue scientifique
- SCC 92-01 Répercussions du réchauffement planétaire sur la politique du gouvernement canadien
- SCC 92-02 Étude de modèles de prévision des variations climatiques et de leurs incidences sur l'hydrologie, les courants côtiers et les pêches en Colombie-Britannique



UNIVERSITY OF TORONTO
INST. FOR ENVIRON'T. STUDIES
RESOURCE CENTRE

CAN BP 20922C02
Canada, ABS.
CCD 92-02
REVIEW OF MODELS FOR CLIMATE CHANGE AND I
HYDROLOGY, COASTAL CURRENTS AND FISHERIES



Environnement
Canada

Environment
Canada

**Étude de modèles de prévision des variations climatiques
et de leur incidences sur l'hydrologie, les courants
côtiers et les pêches en Colombie-Britannique**

Établi pour le

Sommaire du changement climatique
Service de l'environnement atmosphérique

Préparé par

GGA. McBean, O. Slaymaker, T. Northcote, P. LeBlond et T.S. Parsons

Université de la Colombie-Britannique

La présente publication s'inscrit dans le cadre des
rapports sur l'état de l'environnement



Ce papier contient un minimum de 50% de fibres recyclées
dont 10% de fibres recyclées après consommation.

INTRODUCTION

Le Centre climatologique canadien (CCC) a financé plusieurs études touchant les effets éventuels du réchauffement du climat. Le premier numéro du Sommaire du changement climatique indique les principales études de prospective socio-économique entreprises depuis 1984. La liste des titres antérieurs de la série figure au verso de la première page de couverture.

DÉNÉGATION DE RESPONSABILITÉ

La présente publication renferme le résumé des résultats d'une étude menée en vertu d'un contrat par l'université de la Colombie-Britannique pour le centre climatologique canadien. Les avis et opinions qui y sont exprimés sont ceux des auteurs. Ils n'expriment, ni ne reflètent nécessairement ceux du gouvernement du Canada ou de tout organisme de celui-ci.

Pour obtenir à titre gracieux des exemplaires de cet ouvrage, écrire à la :

Division des services climatologiques
Centre climatologique canadien
4905, rue Dufferin
Downsview (Ontario)
M3H 5T4
Tél. : (416) 739-4331/4328

Pour acheter des exemplaires des rapports au complet, écrire à :

Dr. G.A. McBean
Department of Oceanography
University of British Columbia
6270 University Blvd.
Vancouver, B.C.
V6T 1Z4

Publié avec l'autorisation du
ministre de l'Environnement

© Ministre des Approvisionnements
et Services Canada 1992

No de catalogue En57-27/1992-02
ISBN 0-662-59209-3
ISSN 0835-3980

**ÉTUDE DE MODÈLES DE PRÉVISION DES VARIATIONS CLIMATIQUES ET DE
LEURS INCIDENCES SUR L'HYDROLOGIE, LES COURANTS
CÔTIERS ET LES PÊCHES EN COLOMBIE-BRITANNIQUE**

préparée par

G.A. McBean, O. Slaymaker, T. Northcote, P. LeBlond et T.S. Parsons
Université de la Colombie-Britannique

1. FAITS SAILLANTS

- La Colombie-Britannique se caractérise par une topographie complexe, d'importants réseaux hydrographiques et un climat marqué par l'influence océanique. Son économie dépend largement de l'interaction entre le climat et les ressources naturelles.
- D'après les modèles climatiques généraux (MCG), la Colombie-Britannique connaîtra des changements climatiques marquées. A cause de la résolution spatiale relativement faible des modèles et de la grande diversité du relief, les résultats des modèles doivent être interprétés avec plus d'attention.
- On estime que le réchauffement du climat d'équilibre sous un doublement du CO₂ serait de 7 °C en hiver et 4 °C en été avec une incertitude, dans les deux cas, de 3 °C. Les précipitations hivernales quotidiennes augmenteraient d'environ 0,5 mm; en été, le changement serait plus petit et pourrait même être négatif (précipitations moindres).
- Pour pouvoir modéliser le régime hydrologique, il faudra hiérarchiser les modèles portant sur au moins cinq régions hydrologiques distinctes dont les bilans hydriques annuels moyens diffèrent grandement entre eux.
- Nombre d'études ont montré que le changement climatique aura un effet sur les pêches en eaux douces. C'est maintenant qu'il faut mettre au point des modèles qui permettront aux politiques de gestion des pêches d'être plus adéquates, plus souples et plus expérimentales.
- Les écoulements fluviaux, le forçage atmosphérique local et l'interaction avec les eaux profondes ont un effet sur les eaux côtières. Il faut pleinement intégrer chacune de ces composantes à des modèles des eaux du littoral pour comprendre comment elles modifieront le changement climatique et s'y adapteront.
- Sous l'influence du changement climatique prévu, les stocks de saumons pourraient diminuer par suite d'une baisse de la salinité près des côtes et d'une augmentation de la température. Cette diminution aurait un impact majeur sur les pêches. Il est essentiel d'effectuer des études afin de clarifier ces diverses questions.

- Il ressort clairement de tous les modèles étudiés que, bien que des progrès considérables aient été réalisés, beaucoup plus d'études doivent être effectuées. Les recherches doivent comporter une part équilibrée d'observations, d'expériences et de théorie. Vu l'inquiétude que soulève le réchauffement climatique, ces études doivent recevoir un appui solide et débiter le plus rapidement possible, car la période qui s'étend entre le début d'une telle étude scientifique et la publication des résultats finaux se mesure en années voire en décennies, et non pas en mois et années.

2. INTRODUCTION ET OBJECTIFS

Les variations climatiques anthropiques sont récemment devenues un sujet d'importance politique et publique. Il y a maintenant un fort consensus scientifique : le climat global connaîtra plus de changements au cours des 50 à 100 prochaines années qu'il n'en a connu au cours des 5 000 années précédentes. L'impact de tels changements climatiques et la vitesse à laquelle ils se produiront devraient avoir des conséquences planétaires.

Puisque l'économie de la province est liée à son milieu naturel, il est raisonnable de penser que le changement climatique aura un effet important sur son mode de vie et son économie. Par exemple, les habitats des poissons, en eaux douces aussi bien que salées, sont potentiellement vulnérables. Cependant, son relief accidenté, ses larges fleuves et rivières disséquant des chaînes de montagnes et son climat très océanique ne sont pas bien représentés par les MCG courants, ce qui porte à douter de leur fiabilité dans le cas de la Colombie-Britannique.

Ce rapport examine l'état des modèles du changement climatique en ce qui trait à leur applicabilité à la Colombie-Britannique et estime l'incertitude des scénarios. Les liens existant entre le changement climatique aux échelles régionales et plus grandes sont les questions importantes que l'on étudie. Le rapport se penche aussi sur la disponibilité des modèles permettant de déterminer les effets de la variabilité et des changements climatiques sur l'écoulement des cours d'eau, les courants côtiers et les pêches en eaux douces et salées. La fiabilité des modèles est évaluée dans chaque cas. Finalement, on recommande des approches qui permettent d'étudier les effets du changement climatique sur les ressources hydriques et les pêches de la région.

3. MODÈLES CLIMATIQUES ET LEURS APPLICATIONS À LA COLOMBIE-BRITANNIQUE

Le climat de la région est dominé par sa topographie. Les MCG ont généralement des résolutions horizontales de 4 à 5° de latitude, de 5 à 10° de longitude et présentent un relief relativement plat qui ne permet pas la résolution des formes de relief de petites échelles. Il est donc nécessaire, lors de l'examen des simulations du climat actuel ou de scénarios du climat futur produits par les MCG, d'élaborer des méthodes permettant d'établir des liens entre le climat à grande échelle et le climat régional.

Cinq groupes¹ ont publié des résultats de simulations du climat global dans des conditions de doublement de la concentration atmosphérique de CO₂ : le Geophysical Fluid Dynamics Lab (GFDL); le Goddard Institute for Space Studies (GISS); l'Oregon State University (OSU); le National Center for Atmospheric Research (NCAR) et l'United Kingdom Meteorological Office (UKMO). La complexité et la capacité de simulation du climat mondial actuel varient d'un modèle à l'autre. Ainsi, quatre des cinq modèles présentent une résolution horizontale réelle d'environ 4 à 5° de latitude et de 5 à 7° de longitude; pour le cinquième, la résolution est de 8 à 10° de longitude. La province s'étend sur 11° de latitude et environ 11° de longitude. Aucun des MCG n'établit de distinction entre la chaîne Côtière, le plateau intérieur et les Rocheuses; les modèles font comme si la région était constituée d'une chaîne de montagnes basse et peu accidentée. Cependant, il faut reconnaître que les MCG ont été mis au point pour simuler les caractéristiques du climat à grande échelle. Le consensus scientifique montre qu'il n'est en effet pas nécessaire de tenir compte des détails pour pouvoir simuler avec précision le climat à grande échelle.

On a examiné les simulations du climat actuel afin de mesurer la capacité des MCG à projeter des scénarios du climat futur. À cause des techniques d'interprétation adoptées (voir ci-dessous), les températures moyennes de la zone comprise entre 50 et 60 °N ont été comparées avec les observations. Les résultats des modèles du GFDL, du GISS et de l'OSU s'écartaient de moins de 2 °C, hiver comme été. Par contre, les températures du NCAR étaient de 5 °C trop froides en hiver et de 5 °C trop chaudes en été. L'écart des températures hivernales semble s'expliquer par le fait que la simulation est faite trop au sud de la glace qui recouvre la mer de Béring. On peut donc s'interroger sur la validité des résultats de ce modèle pour un doublement du CO₂. Dans le cas des précipitations, les résultats sont plus variables : par exemple, le modèle du GFDL les simule assez bien en hiver le long de la côte, mais non pas en été. Étant donné que la majorité des précipitations estivales est liée à des systèmes convectifs de petite échelle, cette différence est peut-être normale. À partir de la différence entre les précipitations et l'évaporation pour modéliser l'écoulement, le modèle du GFDL calcule un écoulement annuel moyen inférieur à 1 mm/jour le long de la côte; cette valeur se compare aux valeurs d'écoulement lissées de 4 mm/jour et aux

¹ Depuis la préparation du présent rapport, trois modèles climatiques à haute résolution ont été utilisés pour simuler des climats en équilibre sous doublement de CO₂. Pour obtenir de plus amples renseignements, le lecteur est prié de se reporter à l'évaluation scientifique des changements climatiques préparée par le Groupe de travail I du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Les résultats les plus récents concordent avec les conclusions de ce rapport. Le Centre climatologique canadien est l'un des groupes à avoir achevé une telle simulation; le modèle comporte de nombreuses améliorations par rapport à d'autres, notamment une résolution plus élevée et une paramétrisation améliorée des nuages et de la glace de mer. La simulation qu'il fait du climat actuel est très bonne. Pour un doublement du CO₂, le modèle prédit un réchauffement du globe de 3,5 °C et une augmentation des précipitations de 3,8 %, ce qui concorde généralement avec les résultats dont il est question dans le présent rapport.

valeurs de 9 mm/jour à certains sites. Bien que l'écoulement fluvial constitue une variable climatologique importante, il est clair que les MCG actuels sont incapables de simuler celui-ci adéquatement. Les données hydrologiques des pluviomètres utilisées pour les modèles ne conviennent pas aux régions montagneuses. On s'attend cependant à pouvoir obtenir de meilleures estimations de l'écoulement à partir des précipitations produites par les modèles climatologiques pour alimenter les modèles hydrologiques. Les modèles permettent généralement une simulation assez bonne des caractéristiques à grande échelle du climat mais ne permettent pas, par contre, de prévoir les manifestations climatiques induites par le relief.

Pour mieux simuler le cycle hydrologique en Colombie-Britannique on pourrait utiliser des modèles à plus haute résolution intégrés aux MCG à plus grande échelle. Ces modèles, accompagnés des données topographiques appropriées, permettraient de simuler les variations spatiales des précipitations. Pour les composantes «surface terrestre» et «écoulement», il faudrait se servir de modèles beaucoup plus détaillés comportant des données à variation spatiale sur la végétation et les sols et une grille de l'écoulement hydrologique (simulant les bassins versants).

Vu l'importance des variations détaillées du relief pour le climat de la Colombie-Britannique, l'approche normale, qui consiste à évaluer l'impact du changement climatique en utilisant comme points du quadrillage de la zone étudiée le scénario du doublement du CO_2 , ne convient probablement pas. L'approche adoptée dans le présent rapport est la suivante. D'abord, les changements moyens pour la zone entre 50 et 60 °N ont été examinés. Une pondération plus élevée a été accordée aux modèles qui simulent le mieux le climat actuel dans cette région. Ensuite, un ajustement qualitatif a été apporté pour tenir compte des influences océanographiques et topographiques sur le climat. Enfin, le moment d'apparition du changement a été déduit en fonction du rôle modérateur de l'océan pour un doublement du CO_2 .

Le réchauffement du climat d'équilibre sous un doublement du CO_2 , entre 50 et 60 °N, a été établi à 7 °C en hiver et à 4 °C en été; l'incertitude est de 3 °C dans les deux cas (tab. 1). En hiver, les régions côtières se réchaufferaient de 1 à 2 °C de moins à cause de l'influence océanique. Ces chiffres sont des variations moyennes mensuelles; il se peut que la variabilité des températures augmente. Cependant, il est plus probable que la configuration de la distribution des valeurs de la température ressemble à celle d'aujourd'hui. Les températures moyennes étant plus élevées, la probabilité qu'elles dépassent une limite donnée augmentera de beaucoup. On pourrait avoir une augmentation des précipitations hivernales d'environ 0,5 mm/jour et une hausse plus importante le long de la côte; en été, les variations seraient plus faibles et pourraient être négatives (diminution) dans le centre. L'incertitude des changements de la précipitation est plus grande que dans le cas des températures.

Tableau 1. Changements climatiques dus à un doublement du CO₂ en C.-B

	Température (°C)	Précipitation
Hiver	+ 7 (± 3)	+0,5 mm/jour
Été	+ 4 (± 3)	faible variation

On a effectué la plupart des simulations en doublant de façon instantanée la valeur contrôle du CO₂ jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint. Dans la réalité cependant, la valeur du CO₂ augmentera lentement. Alors que le temps de réponse ou d'ajustement de l'atmosphère est d'un mois ou moins, il est de quelques dizaines d'années pour la couche superficielle de l'océan et, pour les fonds marins, il peut atteindre mille ans. Ainsi, parce que l'océan s'ajuste plus lentement que l'atmosphère, le réchauffement réel du système climatique couplé apparaîtra avec un certain décalage après l'atteinte de la température d'équilibre correspondant à une valeur donnée d'augmentation du CO₂. On obtient, par déduction, une échelle très approximative pour une période d'ajustement moyenne de 50 ans. On peut donc calculer le réchauffement pour une année donnée en multipliant les températures par un facteur, qui serait de 0,6 pour le réchauffement en l'an 2050, année du doublement prévu du CO₂ (tableau 2). Vu que la capacité des ordinateurs ne permet pas de déterminer les réactions de l'océan à un doublement de CO₂, la plupart des modèles climatologiques actuels calculent le climat d'équilibre sous un doublement de CO₂.

Tableau 2. Facteurs d'échelle temporels pour calculer le décalage du réchauffement océanique

Année	Facteur	Hiver (°C)	Été (°C)
2000	0,16	1,0	0,5
2025	0,37	2,5	1,5
2050	0,60	4,0	2,5

4. CHANGEMENTS HYDROLOGIQUE EN COLOMBIE-BRITANNIQUE

Les précipitations, déterminées par le climat régional, constituent l'intrant de base des modèles hydrologiques. Le climat thermique local détermine la forme des précipitations (pluie ou neige) et la nature de la neige et de la glace à la surface. Les caractéristiques du sol, par exemple la capacité d'infiltration, la capacité de stockage de l'humidité dans le sol et le régime thermique déterminent l'écoulement, le stockage et d'autres paramètres. Dans la région de la Cordillère canadienne, à cause des effets de topographie et de la diversité des matériaux de surface, l'eau emprunte toute une gamme de trajectoires et les zones de stockage sont très variées.

En Colombie-Britannique, il y a au moins cinq régions hydrologiques distinctes ayant des bilans annuels moyens fort différents (tab. 3). Le rapport «écoulement/précipitation» (Q/P) varie de 0,33 à 0,90. La variable «stockage» n'est importante que pour la région de la chaîne Côtière (à cause des glaciers). Pour

des périodes inférieures à 1 an, la valeur du stockage est plus difficile à estimer. Pour nombre de cours d'eau côtiers, le régime des écoulements est parallèle à celui des précipitations, alors que dans d'autres régions, les effets de l'emmagasinement sous forme de neige sont importants. Les précipitations ont de toute évidence connu des variations considérables au cours du siècle dernier.

Afin d'étudier l'impact des changements climatiques sur l'hydrologie de la Colombie-Britannique, il faudra non seulement partager la zone étudiée en cinq régions mais considérer séparément l'hiver et l'été. Il existe une grande variété de modèles pour la prédiction des effets du changement climatique sur l'hydrologie. En général, il serait essentiel d'utiliser une variante de la méthode du bilan hydrologique de Thornwaite-Mather (1955), y compris l'échelle mensuelle, malgré les difficultés associées au calcul de l'évapotranspiration et de la réalimentation des eaux souterraines; il faut cependant bien cerner ces difficultés. Il y a recrudescence d'intérêt pour les modèles de bilans hydrologiques à cause, entre autre, de la compatibilité de ces derniers avec l'échelle des données produites par les MCG, mais surtout du fait qu'on reconnaît de plus en plus que la principale tâche du chercheur en hydrologie est de résoudre l'équation du bilan hydrologique à plusieurs échelles.

Tableau 3. Bilan hydrologique annuel moyen en C.-B.

	P (mm)	=	Q (mm)	+	ET (mm)	-	S (mm)
Montagnes							
insulaires	4000	=	3500	+	500		
Chaîne							
côtière	3500	=	3150	+	500	-	150
Plateau							
intérieur	300	=	100	+	200		
Montagnes de							
l'intérieur	1200	=	700	+	500		
Rocheuses	800	=	400	+	400		
Régional	1350	=	1020	+	360	-	30

Note : P (précipitation), Q (écoulement), ET (évapotranspiration), S (stockage)

Gleick a traité du fondement de la compatibilité des MCG avec la modélisation des bilans hydrologiques et de la valeur de ceux-ci pour prédire les effets hydrologiques du changement climatique. Les avantages perçus des modèles de bilans hydrologiques par rapport à tous les autres types sont la précision, la flexibilité et la facilité d'utilisation en ce qui a trait aux conséquences hydrologiques du changement climatique et à la capacité d'incorporer les variations intermensuelles et saisonnières. Dans les bassins de drainage d'Europe, l'écoulement est très peu sensible aux variations climatiques par rapport à l'évapotranspiration. Mais, en Colombie-Britannique, où la variable «écoulement» prend des valeurs très différentes selon les lieux, l'écoulement est probablement plus sensible que les variations de l'évaporation. Les modèles d'écoulement soi-disant

conceptuels sont aussi de plus en plus importants. Les effets transitoires, comme l'amplitude, la fréquence et la durée des épisodes extrêmes et des crues printanières sont importants.

Il faut de toute urgence analyser la distribution des données d'écoulement, d'évapotranspiration et des précipitations pour des régions données ainsi que la variabilité inhérente à ces phénomènes. Nombre de projets techniques dépendent du concept des précipitations et des crues maximales probables. Parce qu'une augmentation de température de 1 °C fait augmenter la pression de vapeur saturante au-dessus de la mer de 10 %, les précipitations et l'humidité atmosphérique totales pourraient augmenter; de même on peut s'attendre à une hausse des précipitations liées à des perturbations individuelles. Le concept de la crue maximale probable utilisé dans la démarche suscite cependant des problèmes.

Nous ne savons pas quel sera l'impact du changement climatique sur l'hydrologie de la Colombie-Britannique. Étant donné la vaste gamme d'incidences potentielles sur les poissons, les forêts, l'approvisionnement en eau et l'utilisation des terres, il est urgent de procéder à des études régionales de son bilan hydrologique.

5. EFFETS DE LA VARIABILITÉ ET DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES PÊCHES EN EAUX DOUCES EN C.-B.

Dans le domaine des pêches dans les eaux intérieures, les principaux facteurs environnementaux touchés directement par le changement climatique comprennent l'écoulement fluvial, la température de l'eau, la période d'eau libre de glace et l'oxygène dissous. Les modèles disponibles de simulation du changement climatique à l'échelle du globe semblent donner des résultats trop généraux et incertains pour pouvoir être appliqués dans une région dont le relief est si varié; ils ne permettraient pas de produire avec précision les effets probables sur les pêches en eaux douces. En règle générale, on peut s'attendre à ce que les régions côtières soient soumises à des augmentations plus faibles des températures en hiver et celles du centre à des augmentations plus faibles des précipitations, ou même à des diminutions, en été.

Il existe à l'heure actuelle des modèles pour prédire certains effets des changements climatiques (surtout des augmentations de température) sur certains facteurs écologiques clés qui contrôlent la croissance des poissons et la prédation dans les lacs (durée de la saison libre de glace, température de la surface et de l'épilimnion en été, et biomasse du zooplancton). Par exemple, une hausse de la température annuelle moyenne de l'air (voir ci-dessus) pourrait faire augmenter le nombre de jours sans gel sur les lacs dans la région de Prince-George d'environ 220 jours à près de 290 jours. Comme le réchauffement devrait stimuler la production primaire et la reminéralisation des éléments nutritifs, la production secondaire devrait aussi être étroitement liée à la température. Cependant, à cause du nombre d'interactions compliquées dans les systèmes d'eaux douces, il est impossible d'établir des prédictions générales. Il faut améliorer ces modèles et accroître nos connaissances de la prédiction régionale et locale; en outre, il faut en élaborer d'autres qui faciliteront la

prédiction de paramètres importants (p. ex. écoulement et température des cours d'eau, taux de renouvellement des eaux lacustres, conditions de l'oxygène). N'oublions pas que les changements peuvent avoir des effets positifs et négatifs sur les poissons et les pêches.

Les taux de développement embryonnaire et larvaire des poissons est contrôlé par la température, mais nombre d'effets compliquent les conséquences globales sur les populations de poissons. Par exemple, une émergence plus précoce peut mener à une augmentation de la croissance mais aussi à des mortalités élevées dans les cas où les poissons migreraient plus tôt que d'habitude vers d'autres régions où les conditions ne sont pas favorables. Les effets nets du réchauffement accru de l'épilimnion et de l'appauvrissement en oxygène hypolimnique pourraient être de réduire le volume d'habitats d'été adéquats pour de nombreuses espèces de salmonidés et d'augmenter la fréquence des épisodes de «mortalité estivale».

Après avoir atteint la maturité en pleine mer, le saumon du Pacifique et d'autres espèces de poissons remontent les rivières dont les températures sont à un quasi-optimum physiologique; de petites augmentations pourraient mener à des conditions moins favorables et à une grave mortalité des individus avant la fraye. Des modifications des écoulements fluviaux auraient peut-être aussi des conséquences pour les poissons migrants. Des températures élevées pourraient aussi entraîner un délai dans la fraye et modifier la mortalité avant la reproduction.

Le changement climatique pourrait aussi avoir des conséquences sur la distribution des poissons et la structure des communautés. Les distributions actuelles de poissons sont le résultat de l'immigration au cours d'une longue période. Si le climat se réchauffait, certaines espèces d'eaux chaudes, autres que des salmonidés, pourraient remonter avec succès des portions sud du réseau du Columbia. Bien qu'on ne s'attende pas à ce que le changement climatique dont il a été question précédemment fasse disparaître les espèces existantes, il est plus probable que les limites (latitude et altitude) des espèces se déplacent vers le nord et les terrains plus élevés.

Étant donné que la région écoclimatique de la Cordillère du Pacifique (région côtière) connaîtra probablement un changement climatiques moins marqué que d'autres parties de la province, les poissons (comme la truite fardée et les saumons rose et keta) y seront moins touchés que ceux dont la distribution est plus étendue (comme la truite arc-en-ciel, le Dolly varden, le saumon quinnat, le saumon sockeye et le kokani).

Pour certaines espèces, là où les conditions d'accès et de relief le permettent, la distribution pourrait s'étendre vers le nord et en altitude sous l'effet du changement climatique. Des modèles de prévision pourraient aider à estimer l'ampleur de ce mouvement, mais ce dernier sera essentiellement conditionné par l'accessibilité des poissons aux eaux à moins d'interventions directes sur leurs mouvements par propagation ou par modification des bassins versants.

En cas d'un changement climatique marqué et d'une plus grande variabilité potentielle, les politiques de gestion doivent être plus adéquates et plus souples et être suffisamment expérimentales pour éviter les erreurs catastrophiques associées à la consommation continue des ressources des pêches commerciales et récréatives des eaux douces de la Colombie-Britannique.

6. MODÈLES D'ÉVALUATION DE L'IMPACT DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LES COURANTS DE LA CÔTE DE LA C.-B. - DISPONIBILITÉ ET FIABILITÉ

Trois classes de mécanismes de forçage sont responsables des propriétés et de la circulation des eaux côtières : 1) le forçage engendré par la flottabilité lié à l'écoulement fluvial, 2) le forçage atmosphérique local associé aux processus d'interaction air-mer, 3) l'impact côtier des propriétés océaniques à grande échelle. On peut assimiler toute la côte de la Colombie-Britannique et en fait le Pacifique nord-est à une zone estuarienne : la présence d'une couche saumâtre en surface, essentielle à la structure verticale de la densité, est assurée par l'afflux d'eau douce dans la région côtière. Les processus qui s'exercent à l'interface air-mer servent à renforcer (en été) ou à affaiblir (en hiver) la stratification saline de base; le brassage tidal érode cette stratification et crée des zones de transition frontales. L'advection modifie la distribution horizontale des propriétés de l'eau. Une variation saisonnière marquée de la stratification est due en partie à la diminution estivale des températures et de la salinité dans les couches supérieures. On représente le plus simplement ces propriétés de l'eau par une mince couche (5 à 50 m) d'eau saumâtre reposant sur de l'eau plus salée. La stratification verticale est affaiblie par le brassage dans les régions de forts courants de marée. Des fronts séparent les régions bien mélangées et stratifiées. La variabilité des propriétés des eaux situées en profondeur (sous 100 m) est liée au phénomène de remontée d'eaux engendré par le vent dans la région des plateaux continentaux ainsi qu'au processus de renouvellement des eaux souterraines dans les inlets et les bassins intérieurs.

Les remontées d'eaux profondes estivales sont associées aux vents du nord-ouest qui font dévier les eaux de surface vers le large et entraînent vers la surface les eaux des profondeurs, froides et riches en éléments nutritifs, le long des rives de l'île de Vancouver et des îles de la Reine-Charlotte. Ces processus sont aussi responsables de la majeure partie de la variance observée dans les eaux plus profondes (> 100 m) du plateau et du talus continentaux. Le renouvellement des eaux profondes a lieu lorsqu'un petit volume d'eau plus dense franchit le seuil des bassins côtiers semi-fermés. De temps en temps on observe, en association avec un puissant courant El Niño dans les régions équatoriales, des eaux anormalement chaudes durant quelques mois près des côtes. On a mis en évidence une importante variabilité saisonnière près du littoral ainsi qu'une variabilité saisonnière et interannuelle du tourbillon de l'Alaska, dont l'intensité et l'emplacement varient.

La circulation estuarienne est un écoulement engendré par des différences de densité (déversement d'eau douce dans l'océan). L'eau douce est ainsi amenée vers la mer où elle se mélange graduellement avec l'eau salée sous-jacente. Le flux estuarien d'eau douce vers la mer est modulé par le brassage tidal. Les effets des courants de marée, des vents et de l'écoulement estuarien sont donc dépendants les uns des autres dans une certaine mesure. La caractéristique océanographique la plus importante de la côte de la C.-B. est la stratification établie par l'écoulement des eaux douces. Le forçage atmosphérique direct est important pour deux raisons: les processus qui s'exercent à l'interface air-mer, associés à l'écoulement, produisent la structure verticale de la densité; en outre, les vents engendrent des courants. La modélisation d'une circulation estuarienne à deux dimensions et de la dépendance de celle-ci à l'égard des influences météorologiques, hydrologiques et tidales permet maintenant d'expliquer les marées et le renouvellement des eaux profondes. Avant longtemps, nous pourrons faire des prédictions fiables. En effet, d'ici dix ans à peu près, nous devrions pouvoir avancer une estimation quantitative de l'impact des changements climatiques sur les marées et le renouvellement des eaux profondes.

Les fronts de marée et d'écoulement des cours d'eau constituent des zones de transition des propriétés de l'eau souvent brusques mais brèves. Quoiqu'ils soient moins marqués, les fronts régionaux sont des zones de transition importantes (stratification et brassage vertical des eaux). Au cours des dernières années, on a appris beaucoup de choses sur les fronts, leur emplacement et leur influence sur la productivité biologique. La modélisation numérique est utilisée dans de nombreux domaines; par exemple, on met au point des méthodes pour incorporer les fronts à des modèles de la dynamique des océans et on modélise l'interaction entre les fronts de brassage tidal et les courants côtiers ainsi que la génération de ces fronts. Il est cependant nécessaire d'effectuer d'autres études pour comprendre les autres processus de mélange et de stratification responsables de la formation et de l'évolution des fronts. Il n'existe pas à l'heure actuelle pour le littoral, à l'exception du détroit de Géorgie, de données suffisantes sur les positions et le déplacement des fronts. On ne peut donc dire comment ceux-ci seraient modifiés par le changement climatique.

La modélisation de faibles courants côtiers de densité est devenue de plus en plus populaire au cours des dernières années et met l'accent sur la reproduction des conditions observées le long du littoral où l'écoulement est considérable. Il sera nécessaire de faire une modélisation numérique détaillée afin de pouvoir obtenir les résultats propres à une région donnée. Des observations à l'appui des résultats des modèles sont nécessaires. Il se fait aussi de la modélisation dans le domaine des marées dans les fjords dont l'entrée est barrée par un seuil afin de comprendre les phénomènes responsables du renouvellement des eaux profondes dans les bassins côtiers. Il est nécessaire d'effectuer des applications et des vérifications additionnelles afin d'obtenir un niveau de confiance suffisant pour prédire l'impact de petites variations de l'écoulement et de phénomènes atmosphériques et océaniques associés au réchauffement global.

Les courants et les propriétés de l'eau, au large de la Colombie-Britannique, reflètent dans une grande mesure la réponse de l'océan aux conditions météorologiques locales. Si ces dernières se modifiaient, qu'advierait-il des conditions océanographiques à proximité de la côte? Les études en océanographie ont longtemps mis l'accent sur l'interaction air-mer car c'est à sa surface que l'océan échange masse, quantité de mouvement et énergie avec l'atmosphère. Il semble que les modèles unidimensionnels de la couche de surface puissent, à l'heure actuelle, expliquer l'histoire thermique de la portion supérieure de l'océan, là où l'advection horizontale de chaleur, depuis une autre région que la zone étudiée, ne contribue pas de façon significative au bilan thermique (et où l'apport en eau douce n'est pas important). Il faut apporter des améliorations à ces modèles pour les régions où les effets de salinité sont importants, et préciser les sources d'eaux douces et de chaleur. La prévision demeure problématique et dépend autant de la qualité de la base de données assimilée régulièrement dans les modèles que des détails des modèles eux-mêmes (comme c'est le cas pour la prévision météorologique).

Vu l'hétérogénéité horizontale marquée des propriétés de l'eau et des courants sur la côte de la Colombie-Britannique, l'on pourrait s'attendre à ce qu'un modèle unidimensionnel ne donne pas de bons résultats, là où l'advection est importante. On suggère de modifier ces modèles pour l'apport en eaux douces et d'appliquer ceux-ci cas par cas à diverses zones des eaux côtières. Surtout à cause de l'importance de l'advection horizontale d'eau douce et de chaleur, il n'est pas certain que ces modèles puissent expliquer avec succès la structure verticale de température et de salinité et la position des régions frontales, notamment leur variabilité interannuelle. En outre, la structure verticale de l'eau est si étroitement liée à l'influence de l'écoulement d'eau douce le long du littoral de la région, que les modèles qui tentent de prédire cette structure doivent combiner les modèles d'écoulement de densité et les modèles de la «thermocline» et en même temps tenir compte d'autres effets tel le brassage dû à la marée. Il faut donc travailler dans deux directions. D'abord, tenter de mieux cerner l'emplacement des zones de transition dans les eaux côtières et établir un lien entre celles-ci et les conditions atmosphériques et d'écoulement. Deuxièmement, coupler la modélisation des sources thermiques et estuariennes de densité lorsqu'il s'agit de décrire l'évolution de la couche supérieure. Il faut également tenir compte des effets dynamiques engendrés par le vent.

Les remontées d'eaux profondes sont un phénomène estival fréquent; les régions favorables apparaissent clairement sur les images thermiques satellitaires. Ce phénomène, quoique peut-être le plus remarquable, ne constitue pas la seule réaction des eaux côtières au forçage atmosphérique. Une large part de la variabilité de l'écoulement à cet endroit est attribuable au forçage éolien, soit localement, soit par la propagation de vagues du plateau continental créées plus au sud par l'action du vent.

Les propriétés physiques de la réponse tridimensionnelle de l'océan au forçage météorologique sont mieux connues depuis quelques années et les caractéristiques plus générales semblent pouvoir être reproduites avec un certain degré de confiance, pourvu

que la résolution de la bathymétrie soit adéquate et que les champs de forçage soient connus. Il est toujours difficile de modéliser correctement les caractéristiques de plus petite échelle, telles les fronts, à cause de la complexité de leurs propriétés physiques et de la plus grande difficulté associée à la résolution spatiale.

On se penche actuellement sur les mécanismes responsables de la variabilité interannuelle de la circulation dans les profondeurs. On élabore des modèles et les soumet à des tests; les résultats cependant ne sont pas encore fiables. La modélisation de l'El Niño progresse à grands pas, même si personne ne sait comment (fréquence, intensité) ce phénomène sera affecté, s'il l'est, par le réchauffement du globe.

Tout changement du niveau de la mer observé en un point sur terre est bien sûr relatif à la masse terrestre locale. Les variations locales du niveau de la mer pourraient donc être dues autant à des variations du niveau des terres que de celui de la mer. Ce dernier peut varier parce que la mer contient plus d'eau (fonte des glaciers) ou de l'eau plus chaude (expansion thermique), à cause de changements dans les courants océaniques ou par suite de la réaction de sa surface au vent. La masse terrestre peut s'élever ou s'enfoncer par suite d'un ajustement à la charge glaciaire ou sous l'effet de forces tectoniques de grande échelle.

L'interprétation des séries temporelles océanographiques appliquées à la détection des tendances à long terme du niveau de la mer continue à faire l'objet d'intenses discussions. On réussit de mieux en mieux à déterminer les diverses causes du changement possible du niveau de la mer et il se peut que, d'ici une décennie, lorsque l'interprétation des tendances et leur signification sera plus claire, il soit possible de simuler l'avenir.

7. DISPONIBILITÉ DES MODÈLES DE DÉTERMINATION DES EFFETS DE LA VARIABILITÉ CLIMATIQUES ET DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LES PÊCHES EN MER

Si l'on examine l'effet du changement climatique sur les pêches en eaux salées, on s'aperçoit qu'elles ne seront pas toutes touchées de la même façon. Certaines espèces de poissons ont de longues migrations, d'autres sont sédentaires; il y en a qui passent presque toute leur vie en eaux profondes, où les influences de surface se font beaucoup moins sentir. Alors que certains poissons ne vivent que dans le Pacifique nord-ouest, d'autres ne s'y retrouvent que dans des conditions particulières. La sensibilité aux changements climatiques varie non seulement avec l'espèce, mais aussi selon le cycle de vie d'une espèce donnée. Les interactions entre les pêches et le changement climatique local sont présentées au tableau 4.

Tableau 4. Interaction entre les pêches de la C.-B. et les changements du climat local

Pêche	Stades de la vie touchés par le climat			
	Fraye	Début de la vie en mer	Vie adulte	Migration
Saumon (toute espèce)	L	L	L	L
Hareng	L	L	M	M
Flétan, morue, sole, rascasse, etc.	M	M	S	S
Thon	S	S	S	L
Maquereau	S	S	S	L
Pilchards	M	S	S	L
Anchois	L	L	S	S
Crabes	L	L	S	S
Crevettes	L	L	S	S
Écrevisses	L	L	S	S
Huîtres	L	L	S	S
Bivalves				
L - très touché				
M - moyennement touché				
S - peu touché				

Les modèles de prévision quantitative sont généralement de deux types. Le premier, qui détermine le total des prises admissibles, est ordinairement fondé sur de courtes séries temporelles de données pertinentes; les effets climatiques ne constituent pas en général une importante partie de ces modèles. Le second permet de déterminer le rendement soutenu d'une pêche spécifique, grâce à des séries de données plus longues; certains de ces modèles comportent des facteurs environnementaux qui varieront avec le changement climatique.

Les modèles sur les pêches intégrant des facteurs environnementaux sont de trois types. Tout d'abord, on trouve les modèles statistiques qui établissent des liens entre l'abondance des stocks et un ou deux paramètres physiques. Les modèles à

paramètre unique ne sont probablement pas fiables, mais peuvent sans doute servir pour de courtes périodes ou comme indicateurs de certains rapports écologiques passagers. Les différences interannuelles de petite échelle de température et de salinité, indicateurs jusqu'ici fidèles, pourraient être totalement modifiées par des changements à long terme beaucoup plus importantes de ces paramètres. Les modèles à nombreux paramètres sont probablement plus fiables. Une meilleure connaissance des adaptations physiologiques aux changements environnementaux et de nouvelles techniques mathématiques pourraient accroître leur valeur.

Un deuxième groupe comprend les modèles qui établissent des rapports entre la migration des stocks de poissons adultes et certains facteurs environnementaux ou un indice dérivé du milieu physique. Ces modèles sont particulièrement importants pour la prévision du potentiel de capture de divers stocks ainsi que de leur disponibilité relative pour les pêcheurs canadiens et autres. Les modèles environnementaux à un ou plusieurs paramètres de la migration des poissons adultes donnent probablement des résultats plus fiables que les modèles statistiques de l'abondance des stocks qui dépendent des stades de jeunesse des poissons.

Les modèles trophodynamiques qui visent à prévoir l'abondance du plancton (parfois comportant les rapports avec les poissons) composent le troisième groupe. Ils sont plus étroitement liés aux fonctions de forçage climatique mais moins associés aux stocks de poissons. Ces modèles ont été utiles dans d'autres régions et viennent d'être utilisés pour certains milieux de la côte ouest. Ils pourraient servir à évaluer les répercussions du changement climatique.

Même si la variabilité interannuelle peut être modélisée à partir de séries de données existantes, il faudra recueillir un nombre beaucoup plus grand de données afin de pouvoir déterminer la fréquence des variations à plus long terme (y compris les épisodes d'oscillations australes de l'El Niño).

Si l'on suppose que le réchauffement dû aux gaz à effets de serre est d'environ 5 °C et s'accompagne d'une augmentation des précipitations, les résultats de la plupart des modèles sur les pêches présenteraient des variations. La direction prévue du changement présuppose que l'échelle des événements écologiques n'est pas supérieure à la variabilité interannuelle observée auparavant. Puisque cela est probablement faux, les prédictions sont d'autant plus incertaines et la nécessité de mettre au point de meilleurs modèles devient plus importante.

Le changement climatique prévu, fondé essentiellement sur les modèles statistiques, aurait tendance à donner des résultats plus faibles pour les stocks de saumons à cause d'une diminution de la salinité près de la côte et d'une augmentation des températures. Les régimes de migration des adultes qui reviennent à leurs lieux de naissance seraient aussi touchés. Si ces prévisions pour les stades marins des poissons sont couplées à un scénario d'un écoulement automnal diminué (à cause de la baisse des précipitations estivales sur le centre de la province) alors le changement climatique aurait un effet combiné de diminution des

stocks de saumon. En contrepartie, la présence d'eaux plus chaudes devrait faire augmenter les stocks d'espèces provenant du sud (p. ex., thon, maquereau et calmar). Un réchauffement pourrait faire augmenter l'abondance de l'anchois, mais diminuer celle du hareng. Les colonies d'oiseaux marins pourraient décliner dans la partie sud de la province mais la vie marine plus exotique, comme certaines espèces d'oiseaux et de tortues provenant de latitudes plus méridionales, pourraient revenir fréquemment sur nos côtes. Ces changements pourraient cependant être modifiés par des variations, aussi très incertaines, dans le milieu physique des eaux côtières.

Il faut souligner l'importance d'introduire de nouvelles techniques de gestion qui tiennent compte du changement climatique avant que ne se déclarent des conflits entre les gestionnaires et les utilisateurs des ressources au sujet de stocks décroissant de poissons qui font traditionnellement l'objet des pêches et les stocks accrus d'autres espèces.

Les données scientifiques le démontrent : le climat du globe, et de la Colombie-Britannique en particulier, connaîtront un changement très important au cours des 50 à 100 prochaines années. Les détails de ce changement sont incertains et son impact l'est encore plus. Nous possédons cependant des connaissances de base sur les facteurs physiques et biologiques qui ont un effet sur le climat, l'hydrologie, l'océanographie côtière et les pêches de la région. Nous disposons de modèles pour expliquer quelques uns des facteurs et peut-être même prendre certaines décisions. Pour d'autres, les modèles sont soit trop rudimentaires pour être utiles, soit inexistants. L'objectif du présent rapport est de déterminer et d'évaluer l'état de nos capacités de modélisation et d'établir des directions de recherche scientifique pour corriger la situation.

8. RECOMMANDATIONS - ÉTUDES FUTURES

Il est clair, d'après ce qui précède, qu'il faudra améliorer considérablement les MCG (y compris leur résolution spatiale) avant que l'on puisse obtenir des renseignements plus précis sur les changements climatiques qui toucheront la Colombie-Britannique. Entre temps, il faut effectuer des études afin de tenter d'améliorer la compréhension que nous avons du climat local actuel. Il est important de connaître la distribution des précipitations et les facteurs climatiques qui la contrôlent. Il serait alors possible de relier les changements des facteurs dans les simulations des MCG avec doublement du CO_2 pour en déduire le régime modifié des précipitations. Cette démarche physico-statistique doit être combinée au développement de modèles régionaux qui peuvent être incorporés aux MCG afin d'obtenir des données à l'échelle régionale et le rapport de ces données avec le relief. Le développement de MCG et de modèles régionaux doit passer par la mise au point de modèles sur l'évaporation, l'humidité du sol et l'écoulement qui sont applicables aux sols, à la végétation et à la topographie.

L'on comprendra l'impact du changement climatique sur l'hydrologie à partir du moment où on aura mis au point des systèmes de modélisation qui peuvent tenir compte du type d'intrant que l'on obtient à l'aide des MCG et s'adapter à la situation topographique complexe de la province. Il faudra avoir accès à toute une série hiérarchique de modèles pour traiter les problèmes en fonction d'échelles différentes. Afin de mettre au point et de valider de tels modèles, il faut viser à augmenter de façon non négligeable notre base d'information sur les rapports actuels existants entre le climat, l'écoulement fluvial, l'hydrologie du sol et d'autres aspects. Il faut se concentrer sur l'examen de ces rapports pour mieux comprendre les répercussions du changement climatique sur les pêches en eaux douces.

La capacité de modélisation des phénomènes côtiers est liée au degré de compréhension des caractéristiques physiques, notamment du rapport existant entre un phénomène et ses paramètres de forçage. Dans certains cas simples, par exemple la modélisation thermique de la couche supérieure, la théorie et les applications ont toutes deux des bases solides; dans d'autres cas, comme le renouvellement des eaux profondes, des progrès récents permettent d'envisager avec une certaine confiance la modélisation de l'impact du changement climatique. Dans nombre d'autres cas (dynamique frontale, échanges en travers du plateau continental, variation du niveau de la mer), un manque de données d'observations ou une compréhension théorique incomplète empêche le développement de modèles fiables. Il apparaît donc qu'il faudra consacrer encore au moins une décennie aux observations, aux réflexions théoriques et aux essais sur des modèles avant de pouvoir faire autre chose que de vagues spéculations sur l'impact du changement climatique possible sur les conditions océanographiques de la côte de la Colombie-Britannique.

La modélisation des interactions entre le climat et les pêches doit, à partir de rapports probables connus, en arriver à construire des modèles d'écosystèmes à nombreuses espèces. Les intrants de ces modèles (fonctions de forçage) devraient inclure les divers aspects du changement climatique (p. ex., température, écoulement fluvial, etc.) et les résultats être fournis en terme de production de poissons pour les diverses espèces présentant une importance économique. Afin de mettre au point de tels modèles, les scientifiques de diverses disciplines dont l'océanographie physique, l'étude du plancton, la physiologie et la gestion des pêches devront collaborer. Au départ, il faudrait utiliser les modèles pour créer des scénarios des effets possibles. On pourrait peut-être valider ces modèles à partir de variations entre les observations et les prévisions à posteriori pour les populations de poissons. Nous recommandons une autre approche à utiliser en remplacement ou en parallèle : la mise au point de modèles physiques perfectionnés du milieu marin et leur utilisation pour produire des variables qui peuvent être statistiquement liées aux variables sur les pêches. Ces modèles ne permettraient pas de comprendre aussi bien l'écosystème que nous le jugeons nécessaire, mais seraient par contre plus faciles à mettre au point et à appliquer surtout en ce qui a trait à certains détails de l'abondance des poissons ou de la migration. L'utilisation de ces modèles reviendrait à se servir de prévisions météorologiques numériques pour prévoir les activités agricoles.



Environnement
Canada

Environment
Canada

SOMMAIRE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Étude de modèles de
prévision des variations
climatiques et de leurs
incidences sur l'hydrologie,
les courants côtiers et
les pêches en
Colombie-Britannique

SCC 92-02

Canada

